La Discontinuità di Lehmann e la Struttura del Nucleo Interno Terrestre

L'Esplorazione delle Profondità Inaccessibili

Nel panorama delle scienze della Terra, pochi ambiti di ricerca rappresentano una sfida tanto formidabile quanto lo studio della struttura interna del nostro pianeta. A differenza della superficie terrestre, che possiamo osservare direttamente e persino visitare, l'interno della Terra rimane avvolto in un mistero che si è rivelato straordinariamente difficile da penetrare. Le profondità che si estendono oltre i primi chilometri sotto la crosta terrestre costituiscono un territorio inaccessibile alla esplorazione diretta, un regno dove le condizioni di temperatura e pressione raggiungono valori così estremi da sfidare la nostra immaginazione e da rendere impossibile qualsiasi forma di osservazione immediata.

Le perforazioni più profonde mai realizzate dall'umanità, come il celebre pozzo superprofondo di Kola in Russia, hanno raggiunto approssimativamente i 12 chilometri di profondità, una misura che appare impressionante quando confrontata con l'esperienza quotidiana ma che risulta del tutto trascurabile se paragonata al raggio terrestre di circa 6371 chilometri. Questo significa che abbiamo penetrato fisicamente meno del due per mille della distanza che ci separa dal centro del pianeta. Per accedere alle informazioni sulla struttura profonda della Terra, gli scienziati hanno dovuto sviluppare metodi indiretti di indagine, trasformando fenomeni naturali apparentemente distruttivi come i terremoti in straordinari strumenti di conoscenza scientifica.

In questo contesto di esplorazione indiretta delle profondità terrestri emerge con particolare rilievo la figura di Inge Lehmann, una geofisica e sismologa danese la cui intuizione brillante e il cui meticoloso lavoro di analisi hanno rivoluzionato la nostra comprensione della struttura interna del pianeta. La scoperta che porta il suo nome, la discontinuità di Lehmann, rappresenta non soltanto un risultato scientifico di primaria importanza, ma anche una testimonianza eloquente di come l'acume intellettuale, la perseveranza e la capacità di interrogare criticamente le teorie accettate possano condurre a progressi fondamentali nella conoscenza scientifica.

Il Contesto Storico: Le Conoscenze Prima di Lehmann

Per apprezzare pienamente la portata della scoperta di Inge Lehmann, è necessario ricostruire il contesto scientifico in cui ella operava e comprendere lo stato delle conoscenze sismologiche e geofisiche agli inizi del ventesimo secolo. La comprensione moderna della struttura interna della Terra aveva cominciato a prendere forma soltanto verso la fine del diciannovesimo secolo, quando lo sviluppo di strumenti sismici sempre più sofisticati aveva permesso di registrare con precisione le onde generate dai terremoti e di seguirne la propagazione attraverso il globo terrestre.

La sismologia moderna nacque effettivamente con l'invenzione del sismografo, uno strumento capace di registrare le oscillazioni del terreno associate al passaggio delle onde sismiche. I terremoti generano fondamentalmente due tipi principali di onde elastiche che si propagano attraverso il corpo terrestre: le onde primarie o onde P, che sono onde di compressione analoghe alle onde sonore e che possono propagarsi attraverso qualsiasi tipo di mezzo, sia esso solido, liquido o gassoso, e le onde secondarie o onde S, che sono onde di taglio che inducono nel materiale attraverso cui si propagano movimenti perpendicolari alla direzione di propagazione dell'onda stessa e che hanno la proprietà cruciale di non potersi propagare attraverso mezzi fluidi.

Agli inizi del ventesimo secolo, il geologo britannico Richard Dixon Oldham aveva già compiuto un passo fondamentale nella comprensione della struttura terrestre. Analizzando i sismogrammi registrati in seguito a forti terremoti, Oldham si era accorto che dopo eventi sismici particolarmente energetici, alcune onde sismiche sembravano spingersi fino a una certa profondità all'interno del pianeta per poi venire riflesse e tornare in superficie, comportandosi come se avessero incontrato una barriera o un'interfaccia significativa. Questa osservazione condusse Oldham a postulare l'esistenza di un nucleo terrestre distinto dal mantello sovrastante.

L'evidenza più significativa a favore dell'esistenza del nucleo derivava dal comportamento delle onde S. I sismogrammi mostravano che queste onde, dopo aver viaggiato attraverso il mantello, non riapparivano oltre una certa distanza angolare dall'epicentro del terremoto, come se venissero completamente bloccate a una determinata profondità. Poiché le onde S non possono propagarsi attraverso materiali fluidi, questa osservazione suggeriva fortemente che il nucleo dovesse trovarsi in uno stato liquido o comunque in una condizione tale da non permettere la trasmissione delle onde di taglio.

Nel 1914, il geofisico tedesco Beno Gutenberg apportò un contributo cruciale identificando con precisione la profondità alla quale si manifestava questa transizione fondamentale. Attraverso un'analisi sistematica dei tempi di arrivo delle onde sismiche registrate in numerose stazioni distribuite sulla superficie terrestre, Gutenberg determinò che l'interfaccia tra mantello e nucleo, oggi nota come discontinuità di Gutenberg, si collocava a circa 2900 chilometri di profondità. Questa scoperta definiva con notevole accuratezza le dimensioni del nucleo terrestre e stabiliva una delle suddivisioni fondamentali della struttura interna del pianeta.

Alla fine degli anni Venti del ventesimo secolo, il quadro della struttura interna della Terra che emergeva dalle ricerche sismologiche prevedeva quindi un modello relativamente semplice: una crosta sottile alla superficie, un mantello solido che si estendeva fino a circa 2900 chilometri di profondità, e infine un nucleo di dimensioni ragguardevoli che, sulla base del comportamento delle onde S, doveva trovarsi prevalentemente o interamente in stato liquido. Questo modello rappresentava un progresso enorme rispetto alle concezioni precedenti, ma era destinato a rivelarsi incompleto di fronte al lavoro pionieristico che Inge Lehmann avrebbe intrapreso negli anni successivi.

Inge Lehmann: La Scienziata Dietro la Scoperta

Inge Lehmann nacque a Copenaghen il 13 maggio 1888 in un contesto familiare che valorizzava l'istruzione e che, elemento non comune per quell'epoca, non considerava l'educazione delle bambine come secondaria rispetto a quella dei bambini. Suo padre, Alfred Georg Ludvik Lehmann, era uno psicologo sperimentale che divenne professore all'Università di Copenaghen, e la famiglia Lehmann apparteneva a quell'ambiente intellettuale progressista della capitale danese che si stava aprendo a concezioni più moderne circa il ruolo delle donne nella società.

Un elemento formativo di fondamentale importanza nella giovinezza di Inge fu la frequentazione della scuola pedagogica diretta da Hanna Adler, una figura straordinaria nella storia dell'educazione danese. Hanna Adler, zia del futuro premio Nobel per la fisica Niels Bohr, era stata una delle prime due donne danesi a conseguire una laurea in fisica e aveva dedicato la sua vita all'educazione, fondando una scuola con principi pedagogici innovativi e progressisti. In questa scuola, ragazzi e ragazze studiavano insieme le stesse materie, senza discriminazioni basate sul genere, un approccio che all'epoca rappresentava una vera e propria rivoluzione educativa. Questa esperienza formativa precoce ebbe un impatto profondo sulla giovane Inge, instillando in lei la convinzione che le capacità intellettuali non conoscessero barriere di genere e che il perseguimento della conoscenza scientifica fosse aperto a tutti coloro che possedessero la curiosità, la determinazione e l'intelligenza necessarie.

Inge Lehmann intraprese gli studi universitari iscrivendosi alla facoltà di matematica dell'Università di Copenaghen, dove si distinse per le sue eccellenti capacità analitiche e per il rigore del suo approccio ai problemi scientifici. Durante il suo percorso formativo, trascorse anche un periodo di studio all'Università di Cambridge in Inghilterra, un'esperienza che si rivelò per certi versi difficile a causa delle severe restrizioni imposte alle studentesse in quella prestigiosa istituzione accademica. A Cambridge, le donne erano soggette a regole molto più stringenti rispetto agli studenti maschi, con limitazioni sulla loro libertà di movimento e sull'accesso a determinate strutture universitarie. Questo contrasto tra l'ambiente educativo progressista in cui era cresciuta in Danimarca e le restrizioni vittoriane di Cambridge deve avere rappresentato una fonte di frustrazione per la giovane Lehmann.

Dopo alcuni anni caratterizzati da interruzioni negli studi a causa di problemi di salute e da periodi di lavoro in ambiti diversi dalla ricerca scientifica, Inge Lehmann conseguì finalmente la laurea in matematica nel 1920, all'età di 32 anni. Questa età relativamente avanzata per il completamento degli studi non era inusuale per le donne dell'epoca, che spesso dovevano affrontare ostacoli e interruzioni che i loro colleghi maschi non sperimentavano. Dopo la laurea, Lehmann trovò inizialmente impiego come assistente amministrativa presso il dipartimento di scienze dell'Università di Copenaghen, un ruolo che, sebbene importante, non rifletteva pienamente le sue capacità scientifiche.

La svolta nella carriera di Inge Lehmann avvenne nel 1925, quando fu nominata assistente presso l'Istituto Geodetico Danese. In questa posizione ebbe l'opportunità di dedicarsi allo studio della sismologia, un campo relativamente nuovo che stava rapidamente crescendo di importanza grazie all'espansione delle reti di stazioni sismiche in tutto il mondo. Nel 1928, Lehmann divenne la responsabile del dipartimento di sismologia dell'Istituto Geodetico, una posizione che le conferì l'autorità e le risorse necessarie per condurre ricerche indipendenti

di alto livello. È in questo ruolo che ella avrebbe compiuto la scoperta che l'avrebbe resa celebre nella comunità scientifica internazionale.

La Scoperta della Discontinuità: Un'Anomalia Che Svela un Segreto

La scoperta fondamentale che avrebbe portato Inge Lehmann a rivoluzionare la nostra comprensione del nucleo terrestre ebbe origine dall'analisi meticolosa di sismogrammi relativi a terremoti avvenuti in Nuova Zelanda nel 1929. Questi eventi sismici, particolarmente energetici e ben registrati da numerose stazioni sismiche distribuite in varie parti del globo, fornirono a Lehmann un insieme di dati di qualità eccezionale per investigare il comportamento delle onde sismiche nelle profondità terrestri.

Secondo la teoria prevalente dell'epoca, che postulava un nucleo interamente liquido, le onde P generate da un terremoto dovevano comportarsi in un modo specifico e prevedibile quando attraversavano il confine tra mantello e nucleo. In particolare, si attendeva che queste onde venissero significativamente rallentate e deviate nel momento in cui entravano nel materiale fluido del nucleo, e che esistesse una zona d'ombra sulla superficie terrestre, situata a determinate distanze angolari dall'epicentro del terremoto, dove le onde P dirette non avrebbero dovuto essere rilevabili a causa degli effetti della rifrazione all'interfaccia mantello-nucleo.

Tuttavia, esaminando con estrema attenzione i sismogrammi a sua disposizione, Inge Lehmann notò qualcosa di inaspettato e profondamente significativo. Nella zona d'ombra dove, secondo la teoria del nucleo completamente liquido, non avrebbero dovuto esserci arrivi diretti di onde P, ella osservò invece la presenza di deboli segnali di onde P che sembravano essere riuscite ad attraversare il nucleo e a riemergere dall'altra parte della Terra. Ancora più intrigante era il fatto che questi segnali mostravano caratteristiche che suggerivano un'accelerazione delle onde piuttosto che un rallentamento, un comportamento che non poteva essere spiegato se il nucleo fosse stato interamente costituito da materiale fluido.

Lehmann intuì che questa anomalia poteva essere spiegata soltanto ammettendo l'esistenza di una regione più interna all'interno del nucleo, una regione dove le onde P viaggiavano più velocemente rispetto al nucleo esterno fluido. Poiché la velocità di propagazione delle onde sismiche è intimamente connessa alle proprietà elastiche del materiale attraverso cui si propagano, e poiché i materiali solidi tipicamente mostrano velocità di propagazione superiori rispetto agli stessi materiali in fase liquida, Lehmann giunse alla conclusione che doveva esistere un nucleo interno solido, nascosto all'interno del nucleo esterno liquido e separato da quest'ultimo da una superficie di discontinuità dove le proprietà del materiale cambiavano in modo significativo.

Nel 1936, Lehmann pubblicò le sue conclusioni in un articolo conciso ma denso intitolato semplicemente "P", un riferimento alle onde primarie che erano state il cuore della sua analisi. In questo lavoro fondamentale, ella presentò sia l'evidenza osservativa che aveva condotto alla sua scoperta sia l'interpretazione teorica che spiegava le anomalie osservate nei sismogrammi. Lehmann propose che il nucleo terrestre dovesse essere suddiviso in due

regioni distinte: un nucleo esterno, effettivamente fluido come ipotizzato in precedenza, e un nucleo interno solido dove le onde P potevano propagarsi a velocità più elevate. Il confine tra queste due regioni, situato a circa 5150 chilometri di profondità dal centro della Terra, venne in seguito denominato discontinuità di Lehmann in onore della sua scopritrice.

È importante sottolineare la straordinaria acutezza scientifica che fu necessaria per giungere a questa conclusione. Le evidenze sismiche erano sottili, i segnali deboli e facilmente mascherabili dal rumore di fondo, e l'interpretazione richiedeva non soltanto competenze tecniche avanzate ma anche la capacità di mettere in discussione un paradigma scientifico consolidato. Come avrebbe osservato successivamente il geofisico Francis Birch, la scoperta della discontinuità di Lehmann fu il risultato di un attento e minuzioso esame delle registrazioni sismiche condotto con una maestria degna di un'arte oscura, un lavoro che nessun laborioso calcolo computerizzato avrebbe potuto replicare. In effetti, anche quando strumenti sismici più sensibili e precisi divennero disponibili nei decenni successivi, ci vollero altri trentacinque anni prima che la deviazione delle onde P causata dal nucleo interno potesse essere rilevata in modo diretto e incontrovertibile, una conferma definitiva che giunse soltanto nel 1971.

La Struttura del Nucleo Terrestre: Un Modello Raffinato

La scoperta di Inge Lehmann trasformò radicalmente la nostra comprensione della struttura del nucleo terrestre, conducendo allo sviluppo di un modello molto più articolato e sofisticato rispetto a quello precedentemente accettato. Secondo la concezione moderna, che incorpora la discontinuità di Lehmann come elemento fondamentale, il nucleo può essere suddiviso in due regioni principali caratterizzate da proprietà fisiche profondamente diverse.

Il nucleo esterno si estende dalla discontinuità di Gutenberg, situata a circa 2900 chilometri di profondità, fino alla discontinuità di Lehmann, collocata a circa 5150 chilometri di profondità. Questa regione, con uno spessore approssimativo di 2250 chilometri, si trova in uno stato fluido, come testimoniato dall'impossibilità per le onde S di propagarsi attraverso di essa. Il materiale che costituisce il nucleo esterno è composto principalmente da ferro, con una percentuale significativa di nichel stimata intorno al 6 per cento, e probabilmente arricchito con elementi più leggeri come ossigeno, silicio e zolfo in proporzioni che variano tipicamente tra l'8 e il 10 per cento della massa totale. Questi elementi leggeri giocano un ruolo cruciale nel determinare le proprietà fisiche del nucleo esterno e nella sua dinamica.

Le condizioni ambientali nel nucleo esterno sono estreme oltre ogni immaginazione quotidiana. La pressione alla base del mantello, al confine con il nucleo esterno, raggiunge valori dell'ordine di 140 gigapascal, corrispondenti a circa 1,4 milioni di atmosfere terrestri. Man mano che si procede verso l'interno del nucleo esterno, la pressione continua ad aumentare fino a raggiungere circa 330 gigapascal all'interfaccia con il nucleo interno. La temperatura stimata nel nucleo esterno varia tra circa 4000 e 5000 gradi Celsius, valori paragonabili alla temperatura della superficie del Sole. Nonostante queste temperature elevatissime, che in condizioni normali di pressione atmosferica sarebbero più che sufficienti a vaporizzare il ferro, il materiale del nucleo esterno rimane liquido a causa dell'enorme pressione che abbassa significativamente il punto di fusione delle leghe metalliche presenti.

Il nucleo interno, che si estende dalla discontinuità di Lehmann fino al centro della Terra, ha un raggio di circa 1220 chilometri, una dimensione che corrisponde approssimativamente al 70 per cento del raggio della Luna. Questa regione si trova in uno stato solido, nonostante le temperature siano stimate tra 5000 e 6500 gradi Celsius, valori che in condizioni di pressione ordinaria farebbero fondere qualsiasi metallo. La spiegazione di questo apparente paradosso risiede nell'enorme pressione che caratterizza il nucleo interno, con valori compresi tra 330 e 360 gigapascal, corrispondenti a oltre 3 milioni di atmosfere. A queste pressioni estreme, il punto di fusione del ferro e delle sue leghe viene innalzato a temperature superiori a quelle effettivamente presenti, permettendo quindi la solidificazione del materiale nonostante il calore intenso.

La composizione del nucleo interno è oggetto di ricerche continue e sofisticate. Si ritiene che sia costituito principalmente da una lega di ferro e nichel, con la proporzione di nichel stimata tra il 4 e l'8 per cento della massa totale, un valore coerente con le proporzioni osservate nelle meteoriti metalliche che si pensa rappresentino campioni del materiale primordiale da cui si formò il sistema solare. Oltre a ferro e nichel, il nucleo interno contiene probabilmente piccole quantità di elementi più leggeri, sebbene in concentrazioni inferiori rispetto al nucleo esterno, a causa del fatto che durante il processo di cristallizzazione molti elementi leggeri vengono espulsi dalla struttura cristallina del ferro solido e rimangono disciolti nel ferro liquido circostante.

La densità del nucleo riflette la sua composizione metallica e le condizioni di pressione estrema. Nel nucleo esterno, la densità varia da circa 10 grammi per centimetro cubo all'interfaccia con il mantello fino a circa 12 grammi per centimetro cubo in prossimità del nucleo interno. Nel nucleo interno solido, la densità raggiunge valori ancora più elevati, stimati tra 13 e 16 grammi per centimetro cubo, circa il doppio della densità media del mantello e più del triplo della densità media della crosta terrestre.

La Struttura Cristallina del Nucleo Interno: Anisotropia e Complessità

Uno degli aspetti più affascinanti e sorprendenti del nucleo interno terrestre, emerso dalle ricerche sismologiche condotte negli ultimi decenni, riguarda la sua struttura cristallina e le proprietà anisotrope che ne derivano. L'anisotropia è una proprietà fisica per cui il valore di determinate grandezze fisiche, come la velocità di propagazione delle onde sismiche, dipende dalla direzione lungo la quale vengono misurate. Nel caso del nucleo interno terrestre, questa anisotropia si manifesta nel fatto che le onde sismiche viaggiano più velocemente quando si propagano lungo la direzione dell'asse di rotazione terrestre, ovvero tra i poli Nord e Sud, rispetto a quando si propagano in direzione perpendicolare a questo asse, cioè attraverso il piano equatoriale.

Questa proprietà anisotropa del nucleo interno fu identificata per la prima volta negli anni Ottanta del ventesimo secolo e inizialmente suscitò grande perplessità nella comunità scientifica, poiché non era chiaro quale meccanismo potesse generare una così marcata direzionalità nelle proprietà fisiche di una regione che si presumeva essere relativamente omogenea. La spiegazione che alla fine emerse, e che oggi è generalmente accettata, si

basa sulla natura cristallina del ferro solido che costituisce il nucleo interno e sull'allineamento preferenziale di questi cristalli lungo determinate direzioni.

Il ferro, come molti metalli, può assumere diverse strutture cristalline a seconda delle condizioni di temperatura e pressione a cui è sottoposto. A temperatura e pressione ambiente, il ferro cristallizza in una struttura cubica a corpo centrato, in cui ogni cella elementare del cristallo contiene un atomo di ferro al centro di un cubo e un atomo su ciascuno degli otto vertici. Tuttavia, alle condizioni estreme di pressione e temperatura che caratterizzano il nucleo interno terrestre, gli scienziati ritengono che il ferro assuma una struttura cristallina diversa, nota come struttura esagonale compatta o fase epsilon del ferro. Questa struttura, in cui gli atomi sono disposti secondo una geometria esagonale, presenta anisotropia intrinseca nelle sue proprietà elastiche, nel senso che la risposta del materiale alle sollecitazioni meccaniche dipende dalla direzione lungo cui queste sollecitazioni vengono applicate.

Se i cristalli di ferro nel nucleo interno fossero orientati in modo completamente casuale, con i loro assi cristallografici puntanti in direzioni distribuite uniformemente nello spazio, le anisotropie locali dei singoli cristalli si compenserebbero reciprocamente e il nucleo interno nel suo insieme apparirebbe isotropo alle scale di osservazione sismologica. Tuttavia, le osservazioni mostrano che questo non è il caso. Deve quindi esistere un meccanismo che induce un allineamento preferenziale dei cristalli di ferro, orientandoli in modo tale che i loro assi cristallografici tendano a disporsi parallelamente all'asse di rotazione terrestre.

Il meccanismo responsabile di questo allineamento è ancora oggetto di dibattito scientifico, ma l'ipotesi più accreditata invoca il ruolo della rotazione terrestre e delle deformazioni che essa induce nel nucleo interno. La rotazione del pianeta genera forze che agiscono sul materiale del nucleo interno, e queste forze potrebbero favorire l'allineamento dei cristalli di ferro in crescita lungo direzioni preferenziali. Un altro fattore potenzialmente rilevante è rappresentato dai moti convettivi che potrebbero esistere all'interno del nucleo interno, sebbene la convezione in un materiale solido sia un processo molto più lento e complesso rispetto alla convezione in un fluido.

Le ricerche più recenti hanno rivelato che l'anisotropia del nucleo interno non è uniforme, ma presenta variazioni significative con la profondità e con la posizione geografica. In particolare, si è osservato che l'anisotropia tende ad aumentare procedendo dalla superficie del nucleo interno verso il suo centro, suggerendo che le condizioni che favoriscono l'allineamento dei cristalli diventano più efficaci man mano che si scende verso le profondità maggiori. Inoltre, l'anisotropia risulta essere più marcata nell'emisfero occidentale del nucleo interno rispetto all'emisfero orientale, una scoperta che ha portato alcuni ricercatori a ipotizzare che il nucleo interno potrebbe crescere in modo asimmetrico, con un tasso di cristallizzazione più rapido da un lato rispetto all'altro.

Questa asimmetria nella crescita del nucleo interno potrebbe essere legata a processi che avvengono nel mantello sovrastante o nel nucleo esterno. Se determinate regioni del nucleo esterno rimuovono calore dal nucleo interno a un tasso più elevato rispetto ad altre regioni, la cristallizzazione del ferro procedrebbe più rapidamente nelle zone dove il raffreddamento è più intenso. La gravità agirebbe poi per distribuire il nuovo materiale solidificato in modo da mantenere una forma approssimativamente sferica del nucleo interno, ma questo processo

di redistribuzione potrebbe generare deformazioni e flussi del materiale solido che contribuirebbero all'allineamento dei cristalli e alla generazione dell'anisotropia osservata.

La Stratificazione Interna del Nucleo: Verso una Cipolla di Complessità

Negli ultimi due decenni, l'accumulo di dati sismologici di qualità sempre più elevata, unitamente allo sviluppo di tecniche di analisi sempre più sofisticate, ha condotto a una scoperta sorprendente che sta ulteriormente complicando il nostro quadro del nucleo interno terrestre. Diverse ricerche indipendenti hanno fornito evidenze dell'esistenza di una stratificazione di secondo ordine all'interno del nucleo interno stesso, suggerendo che questa regione, lungi dall'essere un blocco omogeneo di ferro cristallino, potrebbe possedere una struttura interna articolata con proprietà che variano significativamente dalla superficie verso il centro.

L'evidenza principale a favore di questa stratificazione interna proviene dall'analisi dettagliata dell'anisotropia sismica. Come già discusso, il nucleo interno mostra un'anisotropia che fa sì che le onde sismiche viaggino più velocemente lungo l'asse polare che lungo direzioni equatoriali. Tuttavia, analisi recenti hanno rivelato che questa anisotropia non è costante attraverso l'intero spessore del nucleo interno, ma presenta variazioni sistematiche con la profondità. In particolare, alcuni studi hanno identificato un cambiamento nel pattern di anisotropia a una profondità corrispondente a circa la metà del raggio del nucleo interno, suggerendo l'esistenza di una regione più interna, talvolta chiamata "nucleo interno più interno" o "innermost inner core", con proprietà distintive.

Nella regione più esterna del nucleo interno, l'anisotropia si manifesta con l'asse di maggiore velocità orientato approssimativamente lungo l'asse di rotazione terrestre, come descritto in precedenza. Tuttavia, nella regione più interna, il pattern di anisotropia appare diverso, con alcune evidenze che suggeriscono una possibile rotazione dell'asse di anisotropia di circa 50-60 gradi rispetto all'asse di rotazione terrestre. Questo cambiamento nell'orientamento dell'anisotropia implica che i cristalli di ferro nella parte più profonda del nucleo interno devono essere allineati in modo diverso rispetto a quelli nelle regioni più esterne, suggerendo che le condizioni o i processi responsabili dell'allineamento cristallino devono essere cambiati durante l'evoluzione del nucleo interno.

Un'interpretazione plausibile di questa stratificazione invoca la storia termica e dinamica del nucleo interno. Il nucleo interno non è stato presente fin dalla formazione della Terra, ma si è formato progressivamente per cristallizzazione del ferro liquido del nucleo esterno man mano che il pianeta si raffreddava nel corso della sua storia geologica. Le stime termodinamiche suggeriscono che il nucleo interno solido abbia iniziato a formarsi circa 1 miliardo e mezzo di anni fa, e da allora ha continuato a crescere per solidificazione del ferro alla sua superficie esterna, un processo che prosegue ancora oggi al ritmo di circa 6000 tonnellate al secondo.

La parte più interna del nucleo interno, essendo la più antica, si è formata in condizioni che potrebbero essere state significativamente diverse da quelle attuali. Durante la fase iniziale di crescita del nucleo interno, quando esso era ancora molto piccolo, le condizioni termiche

e dinamiche sia nel nucleo esterno che nel mantello erano diverse da quelle che prevalgono oggi. Questi cambiamenti nelle condizioni ambientali potrebbero aver influenzato l'orientamento preferenziale dei cristalli di ferro in crescita, generando la stratificazione nell'anisotropia che osserviamo oggi. Alternativamente, la regione più interna potrebbe aver subito una trasformazione di fase successiva alla sua formazione iniziale, passando forse da una struttura cristallina a un'altra in risposta al continuo aumento di pressione causato dall'accrescimento di nuovo materiale sopra di essa.

Ricerche ancora più recenti hanno suggerito che la stratificazione chimica potrebbe giocare un ruolo importante nella struttura del nucleo interno. Analisi basate su simulazioni computazionali ad alta pressione hanno indicato che l'incorporazione di elementi leggeri come silicio e carbonio nella struttura cristallina del ferro può modificare significativamente le proprietà elastiche del materiale e quindi l'anisotropia sismica risultante. La concentrazione di questi elementi leggeri potrebbe non essere uniforme attraverso il nucleo interno, ma potrebbe variare dalla superficie al centro in seguito ai processi di cristallizzazione frazionata che governano la crescita del nucleo interno. Questa stratificazione chimica si sovrapporrebbe alle variazioni nell'orientamento cristallino, contribuendo a generare la complessa struttura che le osservazioni sismologiche stanno progressivamente rivelando.

Il Campo Magnetico Terrestre: Il Ruolo Cruciale del Nucleo

La struttura del nucleo terrestre, con la sua suddivisione in una regione esterna fluida e una regione interna solida, non è importante soltanto dal punto di vista della conoscenza della struttura interna del pianeta, ma riveste un ruolo assolutamente cruciale per uno dei fenomeni più significativi che caratterizzano la Terra: il campo magnetico terrestre. Questo campo, che si estende per decine di migliaia di chilometri nello spazio circostante il nostro pianeta formando la magnetosfera, svolge una funzione protettiva essenziale per la vita sulla superficie terrestre, schermando il pianeta dalle particelle cariche del vento solare e dai raggi cosmici che altrimenti investirebbero direttamente la superficie con effetti potenzialmente devastanti per gli organismi viventi.

L'origine del campo magnetico terrestre è stata per lungo tempo oggetto di speculazione e dibattito scientifico. Una possibilità che potrebbe apparire plausibile a prima vista sarebbe che il campo magnetico fosse generato da materiali magnetici permanenti presenti all'interno della Terra, analogamente a come un magnete da frigorifero produce un campo magnetico per effetto dell'allineamento permanente dei momenti magnetici atomici nel materiale ferromagnetico. Tuttavia, questa spiegazione si scontra con un ostacolo fondamentale legato alla temperatura. Tutti i materiali ferromagnetici perdono le loro proprietà magnetiche permanenti quando vengono riscaldati al di sopra di una temperatura critica detta temperatura di Curie, che per il ferro si colloca intorno ai 770 gradi Celsius. All'interno della Terra, già a profondità relativamente modeste dell'ordine di alcune decine di chilometri, la temperatura supera ampiamente questo valore, rendendo impossibile l'esistenza di magnetizzazione permanente nelle rocce profonde.

La teoria scientifica che oggi spiega l'origine del campo magnetico terrestre si basa sul concetto di dinamo ad autoeccitazione, un meccanismo che fu proposto per la prima volta in

forma compiuta dal fisico britannico Edward Crisp Bullard nel 1949. Secondo questa teoria, il campo magnetico terrestre è generato e mantenuto dai movimenti del ferro liquido conduttore nel nucleo esterno. Il principio fisico alla base del funzionamento della geodinamo terrestre è l'induzione elettromagnetica, scoperta da Michael Faraday nel diciannovesimo secolo, secondo cui un conduttore elettrico in movimento attraverso un campo magnetico sviluppa al suo interno una forza elettromotrice che dà origine a correnti elettriche.

Nel nucleo esterno terrestre, il ferro liquido è un eccellente conduttore elettrico e si trova in uno stato di moto continuo guidato da correnti convettive. Queste correnti convettive sono sostenute da due meccanismi principali. Il primo è la convezione termica, guidata dal gradiente di temperatura tra il nucleo interno caldo e il mantello relativamente più freddo che sovrasta il nucleo. Il calore fluisce dal nucleo interno verso l'esterno e, se una frazione sufficientemente grande di questo flusso di calore viene trasportata per convezione piuttosto che per conduzione, si stabiliscono moti fluidi su larga scala nel nucleo esterno. Il secondo meccanismo è la convezione composizionale, legata al processo di cristallizzazione del ferro alla superficie del nucleo interno. Quando il ferro liquido si solidifica per formare nuovo materiale del nucleo interno, gli elementi leggeri disciolti nel ferro liquido, come ossigeno e zolfo, non possono essere facilmente incorporati nella struttura cristallina del ferro solido e vengono quindi espulsi nel nucleo esterno liquido circostante. Questo ferro liquido arricchito in elementi leggeri è meno denso del ferro circostante e tende a salire verso l'alto per effetto della spinta di galleggiamento, generando moti convettivi.

La rotazione della Terra introduce un elemento fondamentale nella dinamica del nucleo esterno attraverso l'azione della forza di Coriolis. Questa forza, che agisce su qualsiasi massa in movimento in un sistema di riferimento rotante, devia la traiettoria dei flussi convettivi nel nucleo esterno, conferendo loro un andamento elicoidale o a spirale. Questi flussi complessi di materiale conduttore, muovendosi attraverso il campo magnetico che già esiste nel nucleo, generano per induzione elettromagnetica correnti elettriche, le quali a loro volta producono nuovi campi magnetici secondo la legge di Ampère. Se la geometria e l'intensità dei flussi convettivi sono appropriate, il campo magnetico generato dalle correnti indotte può andare a rinforzare il campo magnetico originale che aveva dato origine alle correnti stesse, innescando così un processo di amplificazione e automantenimento che costituisce l'essenza del meccanismo di dinamo.

La presenza del nucleo interno solido gioca un ruolo importante nel funzionamento della geodinamo terrestre. Come già menzionato, la cristallizzazione del ferro alla superficie del nucleo interno fornisce una potente sorgente di energia per la convezione nel nucleo esterno attraverso il rilascio di elementi leggeri. Inoltre, il nucleo interno modifica la struttura dei flussi nel nucleo esterno in modi complessi. La sua presenza come confine interno solido impone condizioni al contorno sui flussi che possono influenzare la geometria delle celle convettive e quindi le caratteristiche del campo magnetico generato. Alcuni modelli suggeriscono che il nucleo interno possa contribuire a stabilizzare il campo magnetico terrestre, rendendo meno probabili le fluttuazioni intense che potrebbero portare a inversioni frequenti della polarità del campo.

Un aspetto affascinante del campo magnetico terrestre che ha importanti implicazioni per la comprensione della dinamica del nucleo è la sua variabilità temporale. Il campo magnetico

terrestre non è statico, ma cambia continuamente nel tempo su una vasta gamma di scale temporali. Su scale di tempo di anni e decenni, si osserva la cosiddetta variazione secolare, che si manifesta in cambiamenti graduali nell'intensità e nella direzione del campo magnetico in diversi punti della superficie terrestre. Queste variazioni riflettono cambiamenti nei pattern di flusso nel nucleo esterno che modificano la distribuzione delle correnti elettriche responsabili del campo magnetico.

Su scale temporali ancora più lunghe, dell'ordine di centinaia di migliaia di anni, il campo magnetico terrestre può subire inversioni complete di polarità, eventi durante i quali il polo nord magnetico e il polo sud magnetico si scambiano di posizione. Le rocce vulcaniche che solidificano in presenza del campo magnetico terrestre acquisiscono una magnetizzazione remanente che registra la direzione del campo al momento della solidificazione, e l'analisi di sequenze di colate laviche di età diverse ha rivelato che negli ultimi 170 milioni di anni si sono verificate circa 250 inversioni di polarità. Il meccanismo che porta a queste inversioni non è ancora completamente compreso, ma si ritiene che sia legato a instabilità nella dinamica della dinamo nel nucleo esterno, possibilmente innescate da fluttuazioni nei tassi di convezione o da cambiamenti nella geometria dei flussi.

La Rotazione Differenziale del Nucleo Interno: Un Pianeta nel Pianeta

Uno degli aspetti più sorprendenti e ancora non completamente compresi della dinamica del nucleo interno terrestre riguarda la sua rotazione rispetto al resto del pianeta. Poiché il nucleo interno solido è separato dal mantello solido sovrastante dal nucleo esterno fluido, non esiste un accoppiamento meccanico rigido tra il nucleo interno e il resto della Terra che imponga loro di ruotare in modo solidale. Di conseguenza, diventa concepibile che il nucleo interno possa ruotare a una velocità angolare diversa da quella del mantello e della crosta, un fenomeno noto come rotazione differenziale o super-rotazione se il nucleo interno ruota più velocemente, oppure sub-rotazione se ruota più lentamente.

La possibilità teorica di una rotazione differenziale del nucleo interno fu riconosciuta già negli anni Settanta del ventesimo secolo, ma le prime evidenze osservative a supporto di questa ipotesi emersero soltanto negli anni Novanta. Nel 1996, un gruppo di ricercatori guidati da Xiaodong Song e Paul Richards pubblicò uno studio basato sull'analisi delle onde sismiche in cui si argomentava che il nucleo interno stesse effettivamente ruotando più velocemente rispetto alla superficie terrestre, con un tasso di super-rotazione stimato intorno a un grado all'anno. Questa scoperta suscitò grande interesse e dibattito nella comunità geofisica, stimolando numerose ricerche successive volte a confermare o confutare l'esistenza della super-rotazione e a determinarne con maggiore precisione il tasso.

Il metodo utilizzato per rilevare la rotazione differenziale del nucleo interno si basa sull'analisi dei tempi di arrivo delle onde sismiche che attraversano il nucleo interno. Come discusso in precedenza, il nucleo interno presenta anisotropia sismica, con le onde che viaggiano più velocemente lungo l'asse polare che lungo direzioni equatoriali. Se il nucleo interno sta ruotando rispetto alla superficie terrestre, l'orientamento dell'asse di anisotropia cambierà nel tempo rispetto a un sistema di riferimento solidale con la superficie. Di conseguenza, le onde sismiche generate da terremoti che si verificano ripetutamente nella

stessa regione e che vengono registrate nella stessa stazione sismica mostreranno tempi di arrivo che cambiano sistematicamente nel corso degli anni, riflettendo la rotazione dell'anisotropia del nucleo interno.

Gli studi successivi hanno tuttavia prodotto stime molto diverse del tasso di super-rotazione, con valori che variano da circa 0,1 gradi all'anno fino a 1 grado all'anno o più, a seconda dei dati analizzati e delle tecniche di analisi impiegate. Questa dispersione dei risultati ha generato incertezza nella comunità scientifica circa l'esistenza stessa della super-rotazione e, qualora essa esista, circa la sua intensità. Alcuni ricercatori hanno suggerito che le variazioni osservate nei tempi di arrivo delle onde sismiche potrebbero non essere dovute a una rotazione del nucleo interno nel suo insieme, ma piuttosto a cambiamenti nelle proprietà fisiche della superficie del nucleo interno, come deformazioni o variazioni nella distribuzione dei cristalli.

Negli anni più recenti, la questione si è ulteriormente complicata con la pubblicazione di studi che suggeriscono non soltanto che il tasso di super-rotazione potrebbe essere molto più piccolo di quanto inizialmente stimato, ma anche che la rotazione del nucleo interno potrebbe non essere costante nel tempo. Nel 2023, uno studio pubblicato da Yi Yang e Xiaodong Song ha proposto che il nucleo interno terrestre segua un ciclo di oscillazione con un periodo di circa 70 anni, durante il quale la sua velocità di rotazione aumenta e diminuisce ciclicamente, arrivando periodicamente a sincronizzarsi con la rotazione della superficie terrestre prima di invertire la direzione della rotazione differenziale. Secondo questa interpretazione, il nucleo interno avrebbe smesso di super-ruotare intorno al 2009 e avrebbe poi iniziato a sub-ruotare, ossia a ruotare più lentamente rispetto alla superficie.

Se confermata, questa oscillazione periodica della rotazione del nucleo interno avrebbe implicazioni significative per la nostra comprensione della dinamica del sistema Terra. La rotazione del nucleo interno è governata da un delicato equilibrio tra diverse forze e coppie che agiscono su di esso. Da un lato, le interazioni elettromagnetiche tra il nucleo interno e i flussi del ferro liquido nel nucleo esterno, che generano il campo magnetico terrestre, tendono a trascinare il nucleo interno facendolo ruotare. Dall'altro lato, le interazioni gravitazionali tra il nucleo interno e le eterogeneità di densità nel mantello esercitano una coppia che può rallentare la rotazione del nucleo interno o modificarne la velocità angolare. L'esistenza di un'oscillazione periodica suggerirebbe che queste diverse forze non siano in equilibrio statico, ma che la loro competizione dia luogo a una dinamica oscillante complessa.

Un aspetto particolarmente intrigante della possibile oscillazione del nucleo interno riguarda le sue connessioni con altri fenomeni geofisici osservabili. La rotazione differenziale del nucleo interno potrebbe influenzare la rotazione della Terra nel suo insieme attraverso lo scambio di momento angolare tra il nucleo interno e il mantello. Effettivamente, si è osservato che la lunghezza del giorno terrestre, ovvero il tempo impiegato dalla Terra per compiere una rotazione completa su se stessa, non è perfettamente costante ma presenta variazioni decadali con un periodo di circa 60-70 anni, sorprendentemente simile al periodo proposto per l'oscillazione del nucleo interno. Questa coincidenza ha portato alcuni ricercatori a ipotizzare che le variazioni nella lunghezza del giorno possano essere causate, almeno in parte, dalle oscillazioni nella rotazione del nucleo interno.

Analogamente, si è speculato che l'oscillazione del nucleo interno potrebbe essere correlata con le variazioni temporali del campo magnetico terrestre, che anch'esse mostrano fluttuazioni su scale temporali decadali. Tuttavia, è importante sottolineare che tutte queste connessioni rimangono al momento congetturali e richiedono ulteriori ricerche per essere confermate o confutate. La questione della rotazione del nucleo interno rappresenta uno degli ambiti più attivi e controversi della geofisica moderna, e sarà necessario raccogliere ulteriori dati sismologici di alta qualità nel corso dei prossimi decenni per chiarire definitivamente se e come il nucleo interno ruoti rispetto al resto del pianeta.

Gli Stati della Materia nelle Condizioni Estreme: Ferro Superionico e Altre Sorprese

Le condizioni di temperatura e pressione che caratterizzano il nucleo interno terrestre sono talmente estreme da situarsi al di fuori dell'esperienza ordinaria e persino al di là delle condizioni che possono essere facilmente replicate nei laboratori terrestri. A queste condizioni estreme, la materia può assumere stati e configurazioni che sfidano le categorie convenzionali con cui siamo abituati a descrivere la realtà fisica. Uno degli sviluppi più intriganti degli ultimi anni riguarda la proposta che il nucleo interno terrestre potrebbe non trovarsi in uno stato semplicemente solido nel senso classico del termine, ma potrebbe invece esistere in uno stato della materia esotico noto come stato superionico.

Nello stato superionico, la materia presenta caratteristiche ibride che combinano proprietà tipiche dello stato solido con proprietà tipiche dello stato liquido. In particolare, in una struttura superionica, gli atomi più pesanti di una lega o di un composto formano un reticolo cristallino ordinato e relativamente rigido, analogamente a quanto avviene in un solido convenzionale. Tuttavia, gli atomi più leggeri presenti nel materiale non sono incorporati rigidamente in questa struttura cristallina, ma possono invece muoversi relativamente liberamente attraverso gli interstizi del reticolo formato dagli atomi pesanti, comportandosi più come particelle in un liquido che come atomi vincolati in posizioni fisse di una struttura cristallina.

L'esempio più noto di materia superionica è il cosiddetto ghiaccio superionico di acqua, che si forma quando l'acqua viene sottoposta simultaneamente a pressioni elevatissime e a temperature elevate. In questo stato, le molecole di acqua si dissociano, e gli atomi di ossigeno formano un reticolo cristallino ordinato mentre gli atomi di idrogeno, molto più leggeri e mobili, possono diffondere attraverso questo reticolo. Il ghiaccio superionico di acqua è di grande interesse per la planetologia poiché si ritiene che possa costituire la maggior parte dell'interno dei pianeti giganti ghiacciati come Urano e Nettuno, dove le condizioni di pressione e temperatura potrebbero favorire la formazione di questo stato della materia.

Nel contesto del nucleo interno terrestre, l'ipotesi superionica propone che la struttura cristallina sia formata principalmente dagli atomi di ferro, che costituiscono l'elemento di gran lunga più abbondante, mentre gli elementi leggeri presenti in piccole concentrazioni, come atomi di idrogeno, carbonio, ossigeno o silicio, potrebbero comportarsi come componenti mobili capaci di diffondere attraverso il reticolo cristallino del ferro. Questa configurazione potrebbe spiegare diverse proprietà enigmatiche del nucleo interno, in particolare il fatto che

la sua densità risulta essere inferiore a quella che ci si aspetterebbe per ferro puro alle pressioni prevalenti, suggerendo la presenza di elementi leggeri, e il fatto che il nucleo interno sembra essere relativamente "morbido" dal punto di vista delle sue proprietà elastiche, nonostante sia classificato come solido.

Simulazioni computazionali sofisticate condotte negli ultimi anni, che utilizzano metodi di meccanica quantistica per modellare il comportamento degli atomi alle condizioni estreme del nucleo interno, hanno fornito supporto alla plausibilità dello stato superionico. Questi calcoli suggeriscono che, alle pressioni dell'ordine di 330-360 gigapascal e alle temperature di 5000-6500 gradi Celsius, una lega di ferro contenente piccole quantità di elementi leggeri potrebbe effettivamente assumere una configurazione superionica, con il reticolo di ferro solido e gli elementi leggeri mobili.

Tuttavia, è importante sottolineare che l'ipotesi del nucleo interno superionico rimane al momento una proposta teorica che richiede ulteriori verifiche. Una delle difficoltà principali consiste nel fatto che riprodurre sperimentalmente in laboratorio le condizioni del nucleo interno, anche solo per frazioni di secondo, rappresenta una sfida tecnologica formidabile. Gli esperimenti più avanzati utilizzano celle ad incudine di diamante, dispositivi che sfruttano la durezza estrema del diamante per applicare pressioni elevatissime a piccoli campioni di materiale, combinati con riscaldamento laser per raggiungere temperature elevate. Tuttavia, anche questi esperimenti riescono a raggiungere soltanto una frazione delle pressioni presenti nel nucleo interno, e la durata degli esperimenti è troppo breve per permettere al sistema di raggiungere l'equilibrio termodinamico.

Un aspetto particolarmente intrigante dello scenario superionico riguarda le sue possibili connessioni con l'anisotropia sismica del nucleo interno. Se gli elementi leggeri non sono distribuiti uniformemente attraverso il nucleo interno, ma presentano concentrazioni diverse in regioni diverse, questo potrebbe contribuire alle variazioni nelle proprietà sismiche osservate. Ad esempio, se la concentrazione di elementi leggeri diminuisce procedendo dalla superficie del nucleo interno verso il suo centro, come suggerito da alcuni modelli di cristallizzazione frazionata, le proprietà elastiche del materiale cambierebbero corrispondentemente, generando una stratificazione che si aggiungerebbe a quella causata dalle variazioni nell'orientamento cristallino.

Le Implicazioni Cosmiche: Il Nucleo Terrestre nel Contesto Planetario

La comprensione della struttura e della dinamica del nucleo terrestre non riveste importanza soltanto per la conoscenza del nostro pianeta, ma ha anche implicazioni significative per la planetologia comparata e per la nostra comprensione dei processi che governano l'evoluzione dei corpi planetari in generale. L'esistenza di un nucleo metallico differenziato è una caratteristica comune ai pianeti rocciosi del sistema solare interno, inclusi Mercurio, Venere, Terra e Marte, ed è il risultato del processo di differenziazione planetaria che avvenne nelle prime fasi di evoluzione di questi corpi, quando le temperature erano sufficientemente elevate da permettere la fusione parziale o totale del materiale planetario e la conseguente separazione gravitazionale degli elementi densi, come ferro e nichel, che

sprofondarono verso il centro formando il nucleo, dagli elementi più leggeri, come silicati e ossidi, che rimasero in superficie formando il mantello e la crosta.

Tuttavia, nonostante questa similitudine fondamentale, i nuclei dei diversi pianeti rocciosi presentano differenze significative nelle loro proprietà e nella loro evoluzione. Mercurio, il pianeta più interno del sistema solare, possiede un nucleo relativamente molto grande rispetto alle sue dimensioni complessive, con un rapporto tra raggio del nucleo e raggio del pianeta che è significativamente più elevato rispetto alla Terra. Questo nucleo sovradimensionato è probabilmente la conseguenza di un gigantesco impatto che Mercurio subì nelle prime fasi della sua storia, un evento che asportò gran parte del mantello silicatico lasciando esposto o parzialmente esposto il nucleo metallico sottostante. Nonostante le sue dimensioni ridotte e la sua rotazione lenta, Mercurio possiede un campo magnetico globale, sebbene di intensità molto inferiore rispetto a quello terrestre, suggerendo che il suo nucleo esterno potrebbe essere ancora parzialmente fluido e capace di sostenere una dinamo magnetica, anche se probabilmente molto meno efficiente di quella terrestre.

Venere, che per dimensioni e composizione generale è il pianeta più simile alla Terra tra tutti i corpi del sistema solare, presenta tuttavia una differenza fondamentale: non possiede un campo magnetico globale apprezzabile. Questa assenza è sorprendente e ha stimolato numerose speculazioni circa lo stato del nucleo venusiano. Una possibilità è che il nucleo di Venere sia interamente solido, il che impedirebbe il funzionamento di una dinamo magnetica basata sui movimenti di metallo liquido. Alternativamente, il nucleo di Venere potrebbe ancora essere parzialmente liquido, ma la dinamo magnetica potrebbe essere inattiva a causa di una insufficiente convezione nel nucleo esterno, forse dovuta a un mantello troppo caldo che isola termicamente il nucleo impedendogli di raffreddarsi efficacemente. Un'altra ipotesi intrigante è che la dinamo venusiana possa essere intermittente, attivandosi e disattivandosi ciclicamente su scale temporali di centinaia di milioni di anni, e che attualmente ci troviamo in una fase di inattività.

Marte, il pianeta rosso, non possiede oggi un campo magnetico globale, ma le misurazioni magnetiche effettuate dalle sonde orbitali hanno rivelato che alcune regioni della crosta marziana, in particolare nell'emisfero meridionale, presentano intense magnetizzazioni residue che testimoniano l'esistenza di un antico campo magnetico globale che doveva essere presente quando queste rocce crostali si formarono e si raffreddarono al di sotto della temperatura di Curie. Questo antico campo magnetico si è successivamente spento, probabilmente perché il nucleo marziano si è raffreddato e solidificato interamente, oppure perché la convezione nel nucleo esterno si è arrestata. L'assenza di un campo magnetico protettivo ha avuto conseguenze drammatiche per l'evoluzione dell'atmosfera e del clima marziano, permettendo al vento solare di erodere progressivamente l'atmosfera e di trasformare Marte dal mondo relativamente caldo e umido che era probabilmente nelle sue prime fasi evolutive nel deserto freddo e arido che osserviamo oggi.

Il confronto tra questi diversi scenari planetari sottolinea l'importanza critica del nucleo interno per l'evoluzione di lungo termine di un pianeta roccioso. La formazione di un nucleo interno solido per cristallizzazione del ferro liquido del nucleo esterno fornisce una potente sorgente di energia che può sostenere la convezione nel nucleo esterno e quindi mantenere attiva la dinamo magnetica per miliardi di anni. I pianeti più piccoli, che si raffreddano più rapidamente per effetto del loro più elevato rapporto superficie-volume, rischiano di perdere

prematuramente il loro campo magnetico quando il loro nucleo si solidifica interamente. I pianeti più grandi, come la Terra, hanno la possibilità di mantenere un nucleo esterno liquido e un nucleo interno in crescita per un tempo molto più lungo, assicurando la continuità del campo magnetico protettivo.

Queste considerazioni hanno implicazioni significative anche per la ricerca di pianeti extrasolari potenzialmente abitabili. La presenza di un campo magnetico globale è probabilmente un requisito importante per la abitabilità di lungo termine di un pianeta roccioso, poiché protegge l'atmosfera dall'erosione causata dal vento stellare e scherma la superficie dalle radiazioni nocive. La capacità di un pianeta di mantenere un campo magnetico per miliardi di anni dipende dalla sua massa, dalla sua composizione, dalla sua storia termica e da numerosi altri fattori che determinano l'evoluzione del suo nucleo. Una comprensione più profonda della dinamica dei nuclei planetari, informata dallo studio dettagliato del nucleo terrestre, è quindi essenziale per valutare il potenziale di abitabilità di mondi lontani.

Le Prospettive Future: Nuove Frontiere nella Ricerca sul Nucleo Terrestre

Nonostante i progressi straordinari compiuti negli ultimi decenni nella comprensione del nucleo terrestre, numerose questioni fondamentali rimangono aperte e costituiscono l'oggetto di ricerche in corso e future. L'accumulo continuo di dati sismologici di alta qualità, la disponibilità di capacità computazionali sempre più potenti per simulazioni sofisticate, e lo sviluppo di tecniche sperimentali sempre più avanzate per riprodurre in laboratorio le condizioni estreme del nucleo interno stanno aprendo nuove possibilità per approfondire la nostra conoscenza di questa regione così remota e inaccessibile del nostro pianeta.

Uno degli obiettivi principali della ricerca attuale è la caratterizzazione più precisa della stratificazione interna del nucleo interno e la comprensione dei processi fisici che l'hanno generata. L'esistenza di un nucleo interno più interno con proprietà distintive rispetto alle regioni esterne è ormai supportata da numerose evidenze indipendenti, ma i dettagli di questa struttura rimangono da chiarire. In particolare, è importante determinare con maggiore precisione la profondità alla quale avviene la transizione tra le due regioni, l'entità del cambiamento nelle proprietà fisiche attraverso questa transizione, e se la transizione sia brusca, come suggerirebbe l'esistenza di una superficie di discontinuità vera e propria, oppure graduale, come invece implicherebbe un cambiamento progressivo nelle condizioni fisiche o nella composizione chimica.

Un secondo ambito di ricerca attiva riguarda la composizione chimica dettagliata del nucleo interno e, in particolare, l'identificazione degli elementi leggeri presenti e la determinazione della loro concentrazione e distribuzione. Questa informazione è cruciale per comprendere i processi di cristallizzazione che governano la crescita del nucleo interno e per interpretare correttamente le proprietà sismiche osservate. Progressi significativi in questo ambito potrebbero venire da una combinazione di studi geochimici, che vincolano la composizione globale della Terra sulla base di analogie con le meteoriti e della teoria della formazione planetaria, e di esperimenti ad alta pressione che determinano quali elementi leggeri

possono essere incorporati nella struttura cristallina del ferro alle condizioni del nucleo interno.

La questione della rotazione differenziale del nucleo interno rappresenta un altro importante fronte di ricerca che richiede ulteriori dati e analisi. La conferma definitiva dell'esistenza della super-rotazione, la determinazione precisa del suo tasso, e l'eventuale identificazione di oscillazioni o variazioni temporali in questa rotazione sono obiettivi che richiedono il monitoraggio continuo dei tempi di arrivo delle onde sismiche per molti decenni. Questo a sua volta richiede il mantenimento e l'espansione delle reti sismiche globali e lo sviluppo di tecniche di analisi sempre più raffinate capaci di estrarre segnali deboli dal rumore di fondo.

Un aspetto particolarmente promettente per le ricerche future riguarda l'utilizzo di terremoti ripetitivi, ossia terremoti che si verificano ripetutamente nella stessa regione con meccanismi focali simili, e che quindi generano onde sismiche con percorsi attraverso la Terra molto simili. Confrontando i sismogrammi di questi terremoti ripetitivi registrati nel corso di molti anni, è possibile rilevare cambiamenti estremamente piccoli nei tempi di arrivo che potrebbero riflettere la rotazione del nucleo interno o altri cambiamenti temporali nelle sue proprietà. Questa tecnica, nota come analisi di doppietti sismici, ha già fornito alcune delle evidenze più convincenti a favore della super-rotazione, e il suo utilizzo sistematico promette di fornire vincoli sempre più stretti sulla dinamica del nucleo interno.

Sul fronte sperimentale, gli sforzi continuano per riprodurre in laboratorio le condizioni del nucleo interno con maggiore fedeltà e per periodi di tempo più prolungati. Recentemente, alcune ricerche hanno riportato la sintesi di cristalli della forma epsilon del ferro, la fase che si ritiene stabile alle pressioni del nucleo interno, utilizzando celle ad incudine di diamante. Questi cristalli sintetici forniscono campioni preziosi per studiare le proprietà elastiche, termiche e magnetiche del ferro alle alte pressioni, proprietà che possono poi essere incorporate nei modelli sismologici del nucleo interno per migliorare l'interpretazione delle osservazioni.

Un'altra direzione promettente riguarda lo sviluppo di simulazioni computazionali sempre più realistiche della dinamo terrestre e delle sue interazioni con il nucleo interno. Modelli numerici sofisticati che risolvono le equazioni della magnetoidrodinamica nel nucleo esterno, tenendo conto della presenza del nucleo interno solido e delle sue proprietà, stanno cominciando a essere in grado di riprodurre molte caratteristiche osservate del campo magnetico terrestre e delle sue variazioni temporali. Questi modelli potrebbero eventualmente permettere di prevedere l'evoluzione futura del campo magnetico e di identificare i precursori di possibili inversioni di polarità.

Conclusione: Un Viaggio Verso il Centro della Terra

Il percorso di scoperta che condusse Inge Lehmann a identificare l'esistenza del nucleo interno solido della Terra rappresenta uno degli episodi più affascinanti e istruttivi nella storia delle scienze della Terra. Questa scoperta fu il risultato di un'analisi meticolosa di dati sismici, di un'intuizione brillante capace di mettere in discussione il paradigma scientifico dominante, e di un coraggio intellettuale che permise a Lehmann di proporre un modello radicalmente nuovo della struttura interna del pianeta nonostante le inevitabili resistenze e i dubbi che ogni innovazione scientifica significativa incontra nella sua fase iniziale.

La discontinuità di Lehmann, quella superficie invisibile situata a circa 5150 chilometri sotto i nostri piedi che separa il nucleo esterno fluido dal nucleo interno solido, è molto più di una semplice interfaccia geofisica. Essa rappresenta un confine fondamentale nella struttura del nostro pianeta, un luogo dove cambiano radicalmente le proprietà fisiche della materia, dove si verificano processi di cristallizzazione che liberano elementi leggeri alimentando la convezione nel nucleo esterno, dove le temperature e le pressioni raggiungono valori che sfidano la nostra immaginazione e che portano la materia ad assumere stati esotici che combinano proprietà dei solidi e dei liquidi. Questa superficie di discontinuità è anche, in un senso profondo, un archivio della storia termica del pianeta, poiché la sua posizione attuale e le proprietà del nucleo interno che essa delimita sono il risultato di miliardi di anni di evoluzione geologica.

La ricerca sul nucleo interno terrestre illustra magnificamente come la scienza moderna affronti problemi che sembrano intrattabili a prima vista. Non possiamo visitare il centro della Terra, non possiamo scavare tunnel fino a quelle profondità vertiginose, non possiamo portare campioni in superficie per analizzarli direttamente. Eppure, attraverso l'ingegnosità umana, attraverso l'utilizzo creativo dei fenomeni naturali come le onde sismiche, attraverso lo sviluppo di modelli teorici sofisticati e di tecniche sperimentali innovative, siamo riusciti a costruire un quadro dettagliato di questa regione remota, a determinarne la composizione, a comprenderne la struttura, a studiarne la dinamica.

Il lavoro pioneristico di Inge Lehmann ha aperto la strada a generazioni successive di geofisici e sismologi che hanno continuato a esplorare le profondità terrestri, rivelando complessità sempre maggiori nella struttura del nucleo interno, identificando fenomeni come l'anisotropia sismica e la possibile rotazione differenziale, scoprendo stratificazioni interne e variazioni nelle proprietà fisiche che continuano a sfidare la nostra comprensione. Ogni nuova scoperta ci avvicina a una visione più completa e accurata del funzionamento interno del nostro pianeta, ma al tempo stesso apre nuove domande e rivela nuovi misteri che attendono di essere risolti.

In ultima analisi, lo studio del nucleo terrestre non è importante soltanto per la soddisfazione intellettuale di comprendere la natura del pianeta su cui viviamo. Questo ambito di ricerca ha implicazioni profonde per questioni di rilevanza pratica, dalla comprensione dei terremoti e dei fenomeni sismici, al funzionamento del campo magnetico che protegge la vita sulla superficie terrestre dalle radiazioni cosmiche, all'evoluzione di lungo termine del clima e dell'ambiente planetario. La lezione che possiamo trarre dalla storia della scoperta della discontinuità di Lehmann è che la curiosità scientifica, il rigore metodologico, e la capacità di guardare oltre le apparenze immediate possono condurci a comprendere aspetti della realtà che inizialmente sembravano completamente inaccessibili alla conoscenza umana. È una testimonianza eloquente della potenza del metodo scientifico e della capacità della mente umana di penetrare i segreti più profondi della natura.